

## 漏洩弾性表面波を用いた表層欠陥の検出性能向上に関する研究

著者	山本 弘
号	3111
発行年	2003
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/8383">http://hdl.handle.net/10097/8383</a>

氏 名	やま もと ひろし 山 本 弘
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻
学 位 論 文 題 目	漏洩弾性表面波を用いた表層欠陥の検出性能向上に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 坂 真澄
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 坂 真澄      東北大学教授 井上 克己 東北大学教授 福永 久雄      東北大学助教授 三原 毅

## 論文内容要旨

### 第 1 章 序論

漏洩弾性表面波 LSAW (Leaky Surface Acoustic Wave) は走査型超音波顕微鏡 SAM (Scanning Acoustic Microscope) による V (Z) 曲線の導出に用いられ、材料の物性評価に適用されている。LSAW はその速度と使用周波数から算出される 1 波長程度の材料表層を伝播しながら媒質中に漏洩する波である。したがって LSAW は表層の情報を多分に含んでいることになる。LSAW を精度良く抽出することができれば表層の欠陥形状を映像化することが可能となる。LSAW を利用した計測に画像計測、速度計測がある。画像計測では高周波 PFB (Point Focus Beam) 超音波センサによる薄鋼板中の介在物の画像化が試みられているが、LSAW の減衰が大きいために SN 比良く送受信することは困難となり、画像は不鮮明であった。また速度計測では、高周波 LFB (Line Focus Beam) 超音波センサを用いてパルス波による垂直縦波と LSAW の伝播時間差を測定する表面波分離法が研究されている。これら手法の対象となる材料はいずれも表面が研磨されている。このように LSAW 成分を精度良く抽出することは困難とされていた。そこで、材料に対して送受信する音響レンズの縦波成分と LSAW を時間分離するために、音響レンズの入射角を LSAW の臨界角近傍まで受信しないように中抜にすることを提案した。探傷時に中抜音響レンズを水中に浸すことで、縦波成分の超音波は媒質である水中のみを伝播することになる。LSAW 成分は最初、音響レンズ材を伝播し、その後媒質である水中を伝播するために縦波成分と伝播時間に差が生じることになる。このことにより LSAW 成分は縦波成分より早く受信されることになる。この音響レンズの構造により、縦波成分と LSAW の時間分離が可能となり、LSAW 成分を精度良く、かつ SN 比良く抽出できるようになった。この音響レンズを DH レンズ (Delaying Hole Lens) と呼ぶ。DH レンズを装着した表層欠陥検出用超音波センサを開発した。これまで困難とされていた表層の欠陥検出を表層欠陥検出用超音波センサによる新しい探傷法により可能とした。また材料に応じた表層欠陥検出用超音波センサの DH レンズの設計手法を確立した。

## 第2章 超音波を利用した欠陥検出技術

超音波を用いた計測は、主として材料中の微細欠陥を検出する探傷と材料の物性評価に分けられる。試験体に熱衝撃を受けたセラミックス材（マコール材）を用いて探傷を行った。後述する DH レンズにより励起される LSAW の特性の 1 つである受信強度に着目し、欠陥映像の高精細化のための圧電振動子への印加電圧パルスについて検討した。図 2-4 に示すようにパルス波励振は、超音波の伝播経路による吸収の影響を受けて、反射波の中心周波数成分が低周波数側にずれることで画像計測において分解能が低下する。これに対して、バースト波励振は圧電振動子のもつ共振周波数での励振となるため、低周波数側へのずれは小さいため、パルス波励振よりも画像計測では分解能向上が図れる結果となった。ただしバースト波励振の場合、持続時間に注意を要する。(f) に示すように持続時間が長くなると、表面からの反射波とき裂からの反射波との干渉による画像が得られる。本章ではレーリ波の発生しない超音波センサを選定したことで、複雑な超音波の挙動はなく単純な干渉しまによる画像が得られた。計測に用いる超音波センサおよび圧電振動子に印加する電圧の種類は、測定対象物、測定目的により選定することが望ましいと言える。







	Impulse wave	Burst wave	
		50 ns	300 ns
Surface	 (a)	 (b)	 (c)
Defocus - 2mm	 (d)	 (e)	 (f)

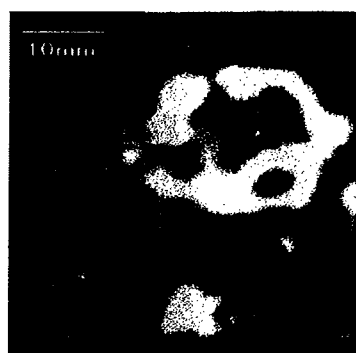
図 2-4 超音波探傷の結果

## 第3章 熱衝撃を受けたセラミックスの超音波探査

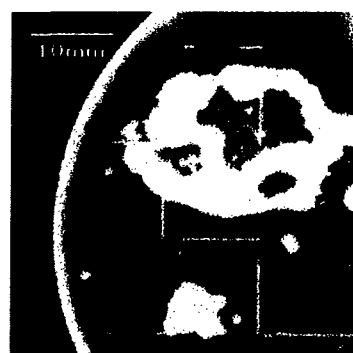
第2章で用いた熱衝撃を受けたセラミックス材料を対象として超音波による材料の物性計測を行った結果、次に示す知見を得た。表面からき裂先端までの伝播時間を計測した結果、セラミックス表面に垂直に入ったき裂は、内部で曲がって進行し停止している。その形状はすり鉢状で、き裂の存在する範囲は表面から  $500\mu\text{m}$  の深さまでであることがわかった。バースト波を利用して求めた超音波伝播速度は、熱損傷を大きく受けた領域で物性変化のために低下した。LSAW の伝播速度低下により、熱損傷の大きな領域の表面近傍における縦弾性係数の低下を検出できることを示した。以上より、LSAW 計測により、熱損傷を受けた領域を推定することが可能となり、材料評価への見通しを実験により確認できた。

## 第4章 表層欠陥検出用超音波センサによるシリコンウエハ接合界面評価

表層欠陥検出用超音波センサにより励起される LSAW は周波数が高くなるにつれて、浸透深さが浅くなることを実験により確認した。波長で規格化した結果、表層欠陥検出用超音波センサにより励起される LSAW の浸透深さは波長の 90% 程度であることがわかった。また図 4-13 に示すように実用に供されている厚さ  $400\text{ }\mu\text{m}$  の貼り合せシリコンウエハの接合界面により、LSAW の浸透深さの検証を行った結果、低周波 11.5 MHz なる DH レンズ法が 50 MHz なる高周波で行う従来法とはく離検出能において同等であることを確認した。また表層欠陥検出用超音波センサの設計手法の妥当性を確認した。



(a) DH レンズ法 (11.5 MHz)

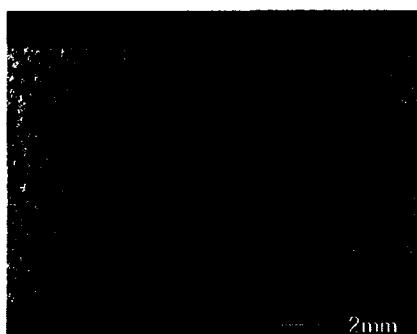


(b) 従来法 (50 MHz)

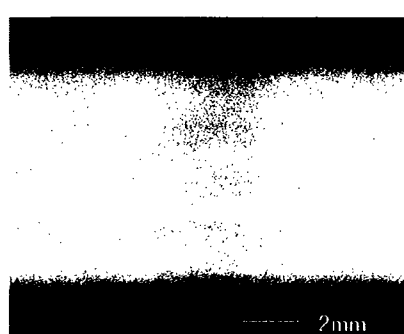
図 4-13 DH レンズ法と従来法との比較

## 第 5 章 表層欠陥検出用超音波センサの開発 —溶射皮膜評価への適用—

DH レンズを用いた LSAW 抽出による表層部の新探傷法において、図 5-6 に示す溶射皮膜のき裂試験体を計測した結果、次のことが確認できた。第一に、従来法に比べて微小き裂を感度良く検出できた。またデフォーカス距離が従来法に比べて非常に小さいことから、試験体への照射超音波ビームも小さくなり周辺部の探傷も鮮明であることが確認できた。さらに、本研究で開発した新探傷法は DH レンズの中抜により、垂直縦波の成分を完全に除去しているために、表面の凹凸情報が探傷画像に含まれにくいことも確認できた。



(a) DH レンズ法



(b) 従来法

図 5-6 き裂試験体に対する DH レンズ法と従来法との比較

## 第6章 表層欠陥検出用超音波センサによる薄鋼板中の介在物検出

開発した表層欠陥検出用超音波センサを用いて、実サンプルである缶用素材である厚さ $230\mu\text{m}$ の薄鋼板試験体を計測した結果、従来行われている方法よりも良好なSN比で介在物を検出することができた。図6-4に示すように $20\text{MHz}$ なるDHレンズ法は、従来法の $100\text{MHz}$ なる探傷に比べ、同等以上の検出能を有することを明らかにし、その有効性を確認した。また使用する超音波センサ周波数の変化により表層の介在物の検出能が異なるため、適正な周波数すなわち適正な波長の選択が必要であると言える。最後に検出した介在物は、図6-7に示す走査型電子顕微鏡写真により、表面直下 $30\mu\text{m}$ の位置に存在し、幅 $80\mu\text{m}$ で、アルミナ系の非金属介在物であることを確認した。

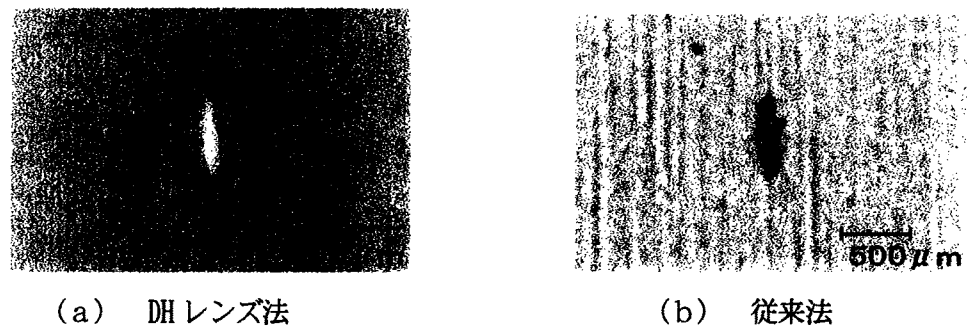


図6-4 超音波探傷の結果

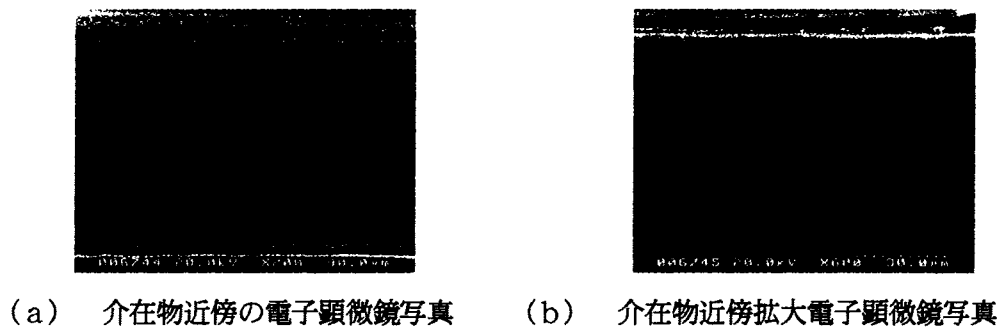


図6-7 介在物の電子顕微鏡写真

## 第7章 結論

本研究は従来、高周波を用いても検出が困難とされていた表層の欠陥を、DH レンズを用いた表層欠陥検出用超音波センサにより、低周波で検出可能としたものである。実用上重要な溶射皮膜中の欠陥、缶用に使用されている薄鋼板中の介在物を対象として、実験的かつ実用的な側面からその検証を行った。表層の欠陥検出には高周波が従来多用されてきた。これは表面と欠陥部からの反射波を分離して受信することで、欠陥の映像化を行い評価するためである。しかし対象物が極薄になると超音波センサの高周波化だけでは欠陥検出が困難となり、装置全体の構成も検討を要することになる。そこで、DH レンズを考案、試作してLSAW 成分抽出のための基礎実験を行い、その可能性を明らかにした。本研究はLSAW を精度良く、時間分離してかつSN比良く抽出する表層欠陥検出用超音波センサの設計手法の確立とその開発を行ったものである。今後表層の欠陥検出性能の更なる向上を担っていく技術である。

# 論文審査結果の要旨

従来、漏洩弾性表面波は走査型超音波顕微鏡による材料の物性評価に用いられてきた。漏洩弾性表面波はその速度と使用周波数から算出される1波長程度の材料表層を伝播しながら媒質中に漏洩する波であるため、表層の情報を多分に含んでいる。同表面波を精度良く、時間分離して抽出することができれば、表層の欠陥を映像化することが可能となる。しかし漏洩弾性表面波を抽出することはこれまで困難とされていた。

著者は、漏洩弾性表面波を時間分離して、かつ良好なSN比で抽出することができる超音波センサの開発に取り組み、低周波数超音波による表層の欠陥の映像化に成功した。本論文はこれらの開発についてまとめたものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、漏洩弾性表面波の特性の一つである受信強度に着目し、欠陥映像の高精細化のための電圧パルスを選択について検討している。従来、バースト波は走査型超音波顕微鏡で用いられているが、持続時間を短くすることでインパルス波を用いた探傷よりも分解能の向上が図れることを明らかにしている。これは有益な成果である。

第3章では、漏洩弾性表面波のもう一つの特性である伝播時間の計測に基づく材料の弾性的性質の評価について検討している。材料の物性変化が、漏洩弾性表面波の速度変化により検出できることを見い出している。

第4章においては、従来、物性評価に用いられていた漏洩弾性表面波を精度良く抽出するためのレンズ(DHレンズと呼ぶ)を考案し、これを装着した超音波センサを提案し、試作して、その原理を確認している。DHレンズにより励起された漏洩弾性表面波の浸透深さを実験により確認し、貼り合せシリコンウエハの接合界面評価に適用し、検証している。これは有益な成果である。

第5章では、第4章で開発した超音波センサの応用として表面の粗い溶射皮膜中のき裂、はく離等の欠陥検出を試みている。開発した超音波センサを用いた新探傷法が従来法に比べて溶射皮膜中の欠陥を良好なSN比で検出できることを実証している。これは有用な成果である。

第6章では、第5章と同様に、開発した超音波センサの応用として缶用等に使用されている薄鋼板において問題となる介在物の検出を試みている。開発した超音波センサによる新探傷法が、高周波数で行われていた従来法に比べて、低周波数でかつ高SN比で介在物を検出できることを実証している。これは有用な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、漏洩弾性表面波を精度良く、時間分離して、かつ良好なSN比で抽出するための超音波センサを開発し、表層の欠陥検出性能の向上を可能にしたもので、機械知能工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。